

УДК 006.91:[621.396+629.78]

МЕТРОЛОГИЯ В СИСТЕМЕ ГЛОНАСС: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**С.И. Донченко, А.Н. Щипунов, О.В. Денисенко, И.С. Сильвестров, В.Н. Федотов, А.С. Гончаров**
ФГУП «ВНИИФТРИ»

На сегодняшний день использование технологий навигации на базе спутниковых навигационных систем можно встретить в широчайшем диапазоне сфер применения – от сельского хозяйства до военного дела, от авиатранспорта до отслеживания местоположения детей, от геодезии и картографии до оценки состояния окружающей среды, страхования, банковской сферы деятельности. При этом одновременно с расширением сфер деятельности расширяется и перечень доступных навигационных систем. Уже к 2020 году в мире будет существовать четыре глобальные навигационные системы: ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), GALILEO (Евросоюз) и BeiDou (Китай), а также целый ряд дополняющих глобальных и региональных систем, обеспечивающих повышение точности решения навигационной задачи – СДКМ (Россия), WAAS (США), MSAS (Япония), EGNOS (Евросоюз), QZSS (Япония), IRNSS (Индия), GAGAN (Индия) и другие. Кроме того, услуги по повышению точности решения навигационных задач с использованием различных технологий предоставляются как коммерческими (Trimble, Novatel, Fugro и др.), так и некоммерческими (IGS) организациями.

При этом одним из основных требований, которые предъявляются пользователем навигационной аппаратуры, наряду с удобством применения и требуемой точностью решения навигационной задачи, очень часто является необходимость обеспечения гарантий того, что декларируемая точность навигационной аппаратуры соответствует фактической точности. Кроме того, необходимо учитывать, что оценку точности необходимо проводить не только для навигационной аппаратуры потребителя, но и для средств измерений, входящих в состав самой спутниковой навигационной системы.

В России на решение данной задачи направлены работы по обеспечению единства измерений в части как навигационной аппаратуры потребителя, так и средств измерений, входящих в состав системы ГЛОНАСС. Необходимо отметить, что средства измерений входят в состав всех составных частей системы ГЛОНАСС - космического комплекса, комплекса функциональных дополнений, комплекса высокоточного апосте-

приорного эфемеридно-временного обеспечения потребителей, комплекса средств фундаментального обеспечения.

Проведение работ по обеспечению единства измерений в Российской Федерации регламентируется, в первую очередь, требованиями Федерального закона №102-ФЗ “Об обеспечении единства измерений”. В соответствии с данным законом в сфере государственного регулирования обеспечения единства допускается применение только средств измерений утвержденного типа, прошедших поверку. При этом к сфере государственного регулирования относятся такие области, как осуществление деятельности по обеспечению безопасности при чрезвычайных ситуациях, выполнение работ по обеспечению безопасных условий и охраны труда, осуществление деятельности в области обороны и безопасности государства, осуществление геодезической и картографической деятельности, выполнение поручений суда, органов прокуратуры, государственных органов исполнительной власти и многие другие. Исходя из вышеуказанного, средства измерений, применяемые в рамках системы ГЛОНАСС, относятся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Навигационная аппаратура потребителя (аппаратура, предназначенная для измерения параметров навигационных сигналов ГНСС и выделения навигационных сообщений с целью определения пространственных координат, составляющих вектора скорости движения, поправки показаний часов потребителя ГНСС и скорости изменения этой поправки) также относится к средствам измерений, а следовательно, находится в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений при её применении в соответствующих областях.

Для решения задач определения и контроля точностных характеристик данных средств измерений Федеральному агентству по техническому регулированию и метрологии, Федеральному космическому агентству и Министерству Обороны Российской Федерации постановлением Правительства Российской Федерации от 30.04.2008 № 323 было поручено создание и развитие системы метрологического обеспечения системы ГЛОНАСС, функциональных дополнений и аппаратуры спутниковой навигации.

Состав системы обеспечения единства измерений (метрологического обеспечения) в системе ГЛОНАСС можно разделить на две основные составляющие: организационно-правовую и техническую.

В рамках организационно-правовой составляющей системы обеспечения единства измерений в системе ГЛОНАСС в первую очередь должны быть установлены и гармонизированы в соответствии с современ-

ными международными и отечественными нормативными документами и требованиями:

- терминология в области измерений;
- порядок воспроизведения и передачи применяемых единиц величин и шкал измерений от государственных первичных эталонов к рабочим средствам измерений;
- комплексы нормируемых метрологических характеристик.

Организационно-правовая составляющая должна содержать комплекс взаимосвязанных нормативных документов, интегрирующих систему обеспечения единства измерений в ГЛОНАСС в существующую государственную систему обеспечения единства измерений. Кроме того, в рамках организационно-правовой составляющей должен быть проведен ряд организационных мероприятий, таких как аккредитация лабораторий и, при необходимости, разработка и аттестация типовых методик.

Техническая составляющая системы обеспечения единства измерений в системе ГЛОНАСС включает в себя государственные первичные эталоны единиц величин, средства передачи единиц величин, а также средства определения и контроля точностных характеристик широкого круга средств измерений.

Создание вышеуказанных технических средств проводится как в рамках отдельных работ, так и в рамках работ по созданию новых средств измерений различными предприятиями и организациями. Конечно же, все создаваемые средства обеспечения единства измерений в системе ГЛОНАСС не могут быть рассмотрены в рамках одной статьи. В связи с этим в дальнейшем основное внимание в рамках данной публикации будет уделено средствам обеспечения единства измерений, созданным во ФГУП “ВНИИФТРИ” по заказу Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в рамках ФЦП “Глобальная навигационная система” в 2007-2011 годах, а также - создаваемым во ФГУП “ВНИИФТРИ” в рамках ФЦП “Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы”.

В рамках выполнения ОКР “Метрология” и ОКР “Эталон” в период 2007-2011 годов во ФГУП “ВНИИФТРИ” были созданы следующие основные средства метрологического и фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС.

Во-первых, был создан комплекс технических средств, обеспечивающих воспроизведение единиц времени и частоты с максимальной на территории России точностью – в первую очередь метрологический цезиевый репер частоты типа “Фонтан” (рис.1),

использующий технологии лазерного охлаждения атомов и предназначенный для повышения точности независимого воспроизведения размера единицы времени Государственным первичным эталоном времени и частоты, и на этой основе повышения точности воспроизведения размера единицы времени эталонами Росстандарта, Минобороны России, Роскосмоса и других ведомств.

Созданный в рамках выполнения ОКР репер позволил вывести характеристики воспроизводимости единицы времени в Российской Федерации на уровень 5×10^{-16} , что превосходит характеристики лабораторий времени во Франции, Германии, Италии, Великобритании и уступает только характеристикам лаборатории NIST, США.

Также был разработан комплекс технических средств, обеспечивающих передачу единиц времени и частоты – комплекс дуплексных сличений шкал времени (рис.2), обеспечивающий погрешность сравнений шкал времени ± 2 нс практически по всей территории Россий-



Рис.1. Метрологический цезиевый репер частоты типа “Фонтан”

ской Федерации (зависит от зоны покрытия используемого спутника), эталон-переносчик единиц времени и частоты (рис.3), обеспечивающий погрешность хранения шкалы времени не более ± 2 нс при времени транспортирования 24 ч, однако являющийся полностью независимым, и комплекс формирования шкалы времени, приближенной с заданной точностью к Национальной шкале времени UTC(SU), и передачи формируемой шкалы времени в НКУ ГЛОНАСС в реальном масштабе времени (рис.4), при этом средняя квадратическая погрешность при времени измерения 1 сут не должна превышать 2 нс.



Рис. 2. Комплекс дуплексных сличений шкал времени (мобильная и стационарная составляющая)



Рис.3. Эталон-переносчик единиц времени и частоты (в мобильной лаборатории и отдельно)



ФГУП “ВНИИФТРИ”

НКУ ГЛОНАСС

Рис.4. Комплекс формирования шкалы времени, приближенной с заданной точностью к Национальной шкале времени UTC(SU), и передачи формируемой шкалы времени в НКУ ГЛОНАСС в реальном масштабе времени

Последней частью средств, обеспечивших выполнение целевых индикаторов Росстандарта в части UTC(SU) в рамках ФЦП “Глобальная навигационная система”, явился групповой эталон Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (рис.5), предназначенный для повышения стабильности и надежности системной шкалы времени ГЛОНАСС, шкалы координированного времени Государственного первичного эталона единиц времени и частоты – UTC(SU) и шкал времени модернизированных эталонов Росстандарта, Минобороны России и других министерств и ведомств. Среднее квадратическое относительное случайное двухвыборочное отклонение частоты группового эталона на интервале (10- 30) суток составляет не более $(8-10) \times 10^{-16}$.



Рис.5. Групповой эталон ГСВЧ

Вторым направлением работ ФГУП “ВНИИФТРИ” являлось создание средств оценки и контроля точностных характеристик радиотехнических средств измерений, применяемых в системе ГЛОНАСС.

В 2007-2011 году были созданы такие средства метрологического обеспечения, как:

- средства метрологического обеспечения средств измерений характеристик антенно-фидерных устройств (АФУ) (рис.6): погрешность

определения положения фазового центра АФУ не более 1 мм; погрешность измерения временных задержек АФУ не более 0,1 нс;

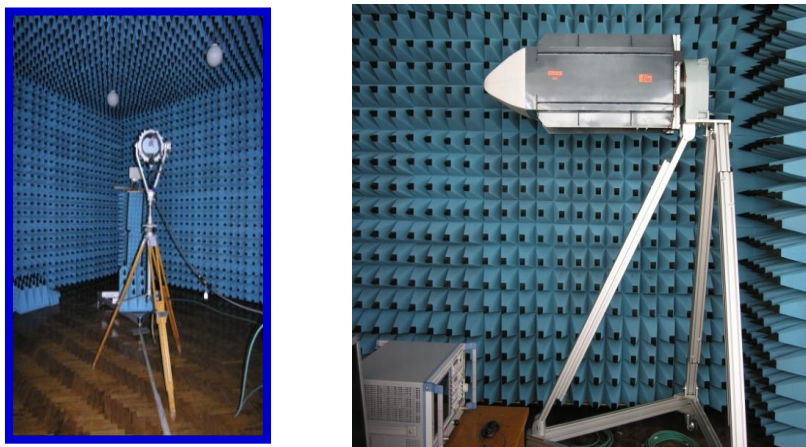


Рис. 6. Средства метрологического обеспечения средств измерений характеристик антенно-фидерных устройств

- средства метрологического обеспечения средств измерений характеристик радиотехнических трактов (рис.7): эталонный источник навигационных сигналов и эталонный приемник навигационных сигналов; инструментальная погрешность измерений текущих навигационных параметров не более 0,05 м;



Рис.7. Эталонный источник навигационных сигналов и эталонный приемник навигационных сигналов

- средства метрологического обеспечения средств измерений метрологических характеристик и испытаний навигационной аппаратуры

потребителей (рис.8): определение точностных характеристик спутниковой геодезической аппаратуры (погрешность измерений расстояния в диапазоне от 500 м до 30000 м составляет от 0,005 м до 0,02 м), определение точностных характеристик НАП, интегрированной с инерциальными датчиками (погрешность при воспроизведении горизонтальных и вертикальных перемещений не более 0,01 м; погрешность при воспроизведении угловых перемещений не более 1 угл. мин).



Рис.8 Средства метрологического обеспечения средств измерений метрологических характеристик и испытаний навигационной аппаратуры потребителей



Рис. 9. ГЭТ 199-2012

Еще одним направлением работ ФГУП “ВНИИФТРИ” являлось создание средств оценки и контроля точностных характеристик средств измерений длины, применяемых в системе ГЛОНАСС.

В рамках выполнения ФЦП был разработан, а 28.12.2012 утвержден Государственный первичный специальный эталон единицы длины (ГЭТ 199-2012), обеспечивающий воспроизведение единицы длины в диапазоне от 24 м до 4000 км (рис.9).

Однако повышение требований потребителей к системе спутниковой навигации, а также развитие зарубежных систем навигации, таких как GPS, GALILEO и BeiDou привело к необходимости проведения работ по дальнейшему развитию системы ГЛОНАСС, включая и комплексы фундаментального и метрологического обеспечения, для выполнения поставленных перед системой задач.

Постановлением Правительства Российской Федерации №189 от 03 марта 2012 г. была утверждена Федеральная целевая программа “Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы”, в состав государственных заказчиков которой также вошел Росстандарт. Исполнителем широкого ряда работ в рамках данной ФЦП является ФГУП “ВНИИФТРИ”. При этом следует отметить, что выполнение работ ФГУП “ВНИИФТРИ” в части метрологического обеспечения необходимо для успешного создания и введения в эксплуатацию средств измерений, являющихся основой для выполнения таких целевых индикаторов ФЦП, как погрешность определения местоположения в реальном времени и погрешность определения времени потребителя.

На сегодняшний день в соответствии с утвержденной ФЦП ФГУП “ВНИИФТРИ” по заказу Росстандарта выполняются работы по следующим направлениям:

- Развитие средств воспроизведения, хранения и передачи единиц времени, частоты и Национальной шкалы времени UTC(SU).

Основные работы по данному направлению включают ОКР:

а) разработка опытного образца эталонного комплекса времени и частоты, предназначенного для оснащения комплексов хранения национальной шкалы времени Российской Федерации, и модернизация комплексов хранения Национальной шкалы времени на основе оснащения эталонными комплексами времени и частоты и техническими средствами инфраструктуры обеспечения хранения шкал времени. Модернизации должны быть подвергнуты комплексы в Менделеево, Новосибирске, Иркутске, Хабаровске и Петропавловске–Камчатском. По окончании выполнения работ должны быть достигнуты следующие характеристики:

- нестабильность (среднеквадратическое относительное двухвыборочное отклонение) частоты комплекса не более $(2-3) \cdot 10^{-16}$ при времени измерения 1 - 10 сут;

– пределы допускаемого смещения Национальной шкалы времени относительно Международной шкалы координированного времени ± 3 нс;

б) создание нового поколения хранителей единиц времени и частоты на основе «фонтана» атомов рубидия, имеющих нестабильность частоты не более $(1-2) \cdot 10^{-16}$, для оснащения эталонов единиц времени и частоты и последующей передачи более точной время-частотной информации прецизионным наземным и бортовым средствам системам ГЛОНАСС;

в) создание образца оптического репера частоты наземного базирования на холодных атомах, обеспечивающего независимое воспроизведение единицы частоты с погрешностью не более $1 \cdot 10^{-16}$, а также разработка аппаратуры сличений частоты оптического стандарта с репером частоты на холодных атомах стронция, основанной на использовании технологий фемтосекундных лазеров;

г) проведение теоретических и экспериментальных исследований по разработке принципов создания перспективных наземных и мобильных лазерных стандартов частоты и времени (оптических часов), включая разработку лабораторных макетов оптических часов наземного базирования (с нестабильностью по частоте 10^{-16} - 10^{-17} за сутки) и мобильного базирования (с нестабильностью по частоте 10^{-15} - 10^{-16} за сутки).

На рис. 10 показаны макеты составных частей опытных образцов, разработанные в ходе выполнения вышеуказанных работ в 2012-2013 годах.

Результаты проведенных на сегодняшний день по вышеуказанным направлениям работ в рамках эскизных и технических проектов подтверждают возможность выполнения поставленных задач в соответствии с предложенными техническими решениями. Совместно с работами, которые будут проводиться в рамках ФЦП на более поздних этапах, результаты вышеуказанных работ позволят выполнить требования к системе ГЛОНАСС в части согласования Национальной шкалы времени UTC(SU) со шкалой UTC, а также – с системной шкалой времени ГЛОНАСС.



Рис.10. Макеты составных частей эталонного комплекса времени и частоты



Рис.11. Макеты составных частей хранителя единиц времени и частоты

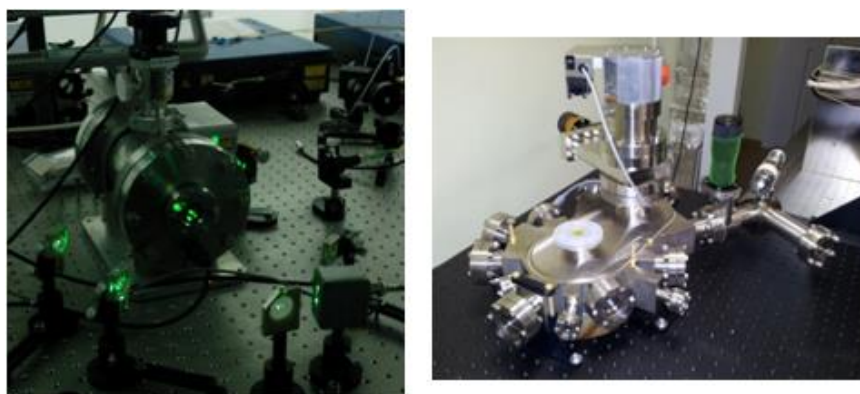


Рис.12. Макеты составных частей оптического репера частоты



Рис. 13. Макеты составных частей фемтосекундных оптических часов

• Следующим направлением работ является развитие средств определения фундаментальных астрономо-геодезических параметров в части создания высокоточной планетарной модели гравитационного поля Земли (ГПЗ), построенной на основе комбинированной обработки различных типов наблюдений, новой цифровой модели квазигеоида, уточненной версии Государственной геоцентрической системы координат (ГГСК) и средств моделирования ГПЗ повышенной точности с учетом временных изменений параметров. В 2013 г. во ФГУП “ВНИИФТРИ” был завершен эскизный проект, в рамках которого были установлены основные технические и программные решения, в том числе – определен предполагаемый состав аппаратно-вычислительного комплекса (рис.14).

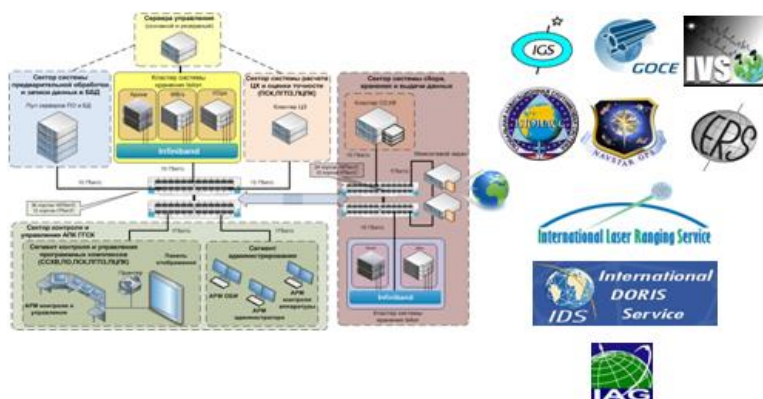


Рис. 14. Предполагаемый состав аппаратно-вычислительного комплекса и источники получения зарубежных измерительных данных

По окончании выполнения работ должны быть достигнуты следующие характеристики:

- определение высот квазигеоида по цифровой модели квазигеоида в области действия модели с учетом погрешности узловых значений высот квазигеоида и погрешности интерполяции не более 0,1 м на первом этапе и 0,05 м на втором этапе;

- привязка ГГСК к центру масс Земли и разворот ГГСК относительно Международной земной системы координат со среднеквадратической погрешностью не более 0,05 м – для первого этапа, 0,01 м – для второго этапа.

Следующим направлением работ является создание средств оценки и контроля характеристик радиотехнических средств измерений, применяемых в системе ГЛОНАСС в части создания и развития стационарных и мобильных комплексов метрологического обеспечения радиотехнических средств измерений из состава НКА, НКУ, а также

навигационной аппаратуры потребителя. Примерами создаваемых средств являются высокоточные комплексы измерения навигационных параметров, воспроизведения навигационных и помеховых сигналов (рис.15), измерения параметров антенно-фидерных устройств (рис.16), контроля характеристик оптического излучения и структуры сигнала, контроля геометрических параметров конструкций антенн, оценки энергетических характеристик сигналов (рис.17), имитации пространственного навигационного поля ГНСС (рис.18) и другие технические средства.

По окончании выполнения работ должны быть достигнуты следующие основные характеристики:

- инструментальная погрешность измерений псевдодальности (по уровню вероятности 0,95), не более:

по сигналам ГНСС с частотным разделением 0,05 м;

по сигналам ГНСС с кодовым разделением 0,03 м.

- среднее квадратическое отклонение (СКО) случайной составляющей инструментальной погрешности формирования псевдодальности не более 0,01 м;

- систематическая составляющая инструментальной погрешности формирования псевдодальности, обусловленная задержками сигналов времени при частотном и кодовом разделении навигационных сигналов, в пределах $\pm 0,1$ нс;

- погрешность (СКО) определения положения характерных точек (маркеров) установки АФУ не более 0,001 м;

- СКО случайной составляющей инструментальной погрешности формирования псевдодальности не более 0,05 м;

- число каналов для одновременно воспроизводимых навигационных сигналов систем ГЛОНАСС и GPS по принципу «1 канал - 1 НКА» не менее

8.

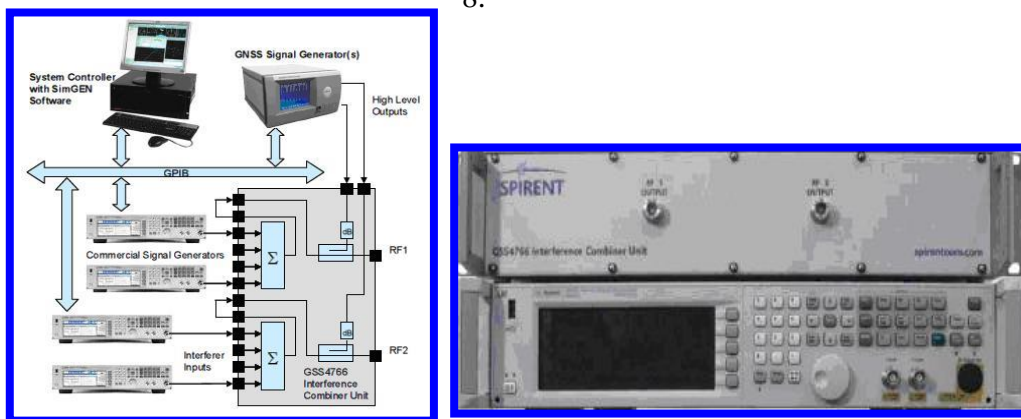


Рис. 15. Составные части средств воспроизведения навигационных и помеховых сигналов

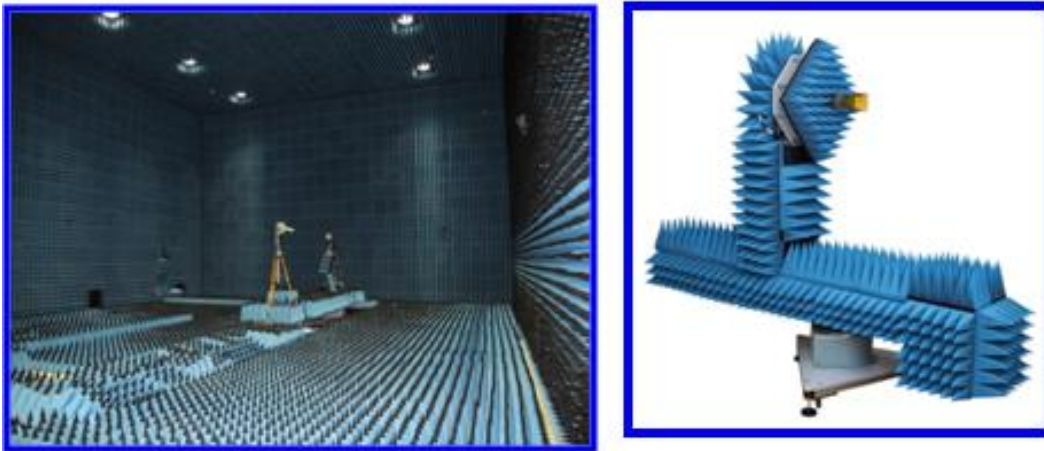


Рис. 16. Составные части средств измерения параметров антенно-фидерных устройств

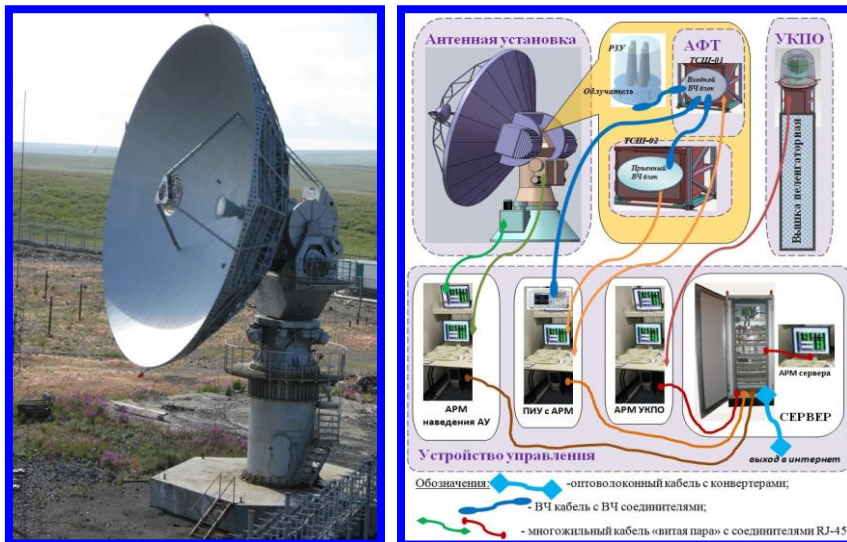


Рис. 17. Прототип средств оценки энергетических характеристик сигналов

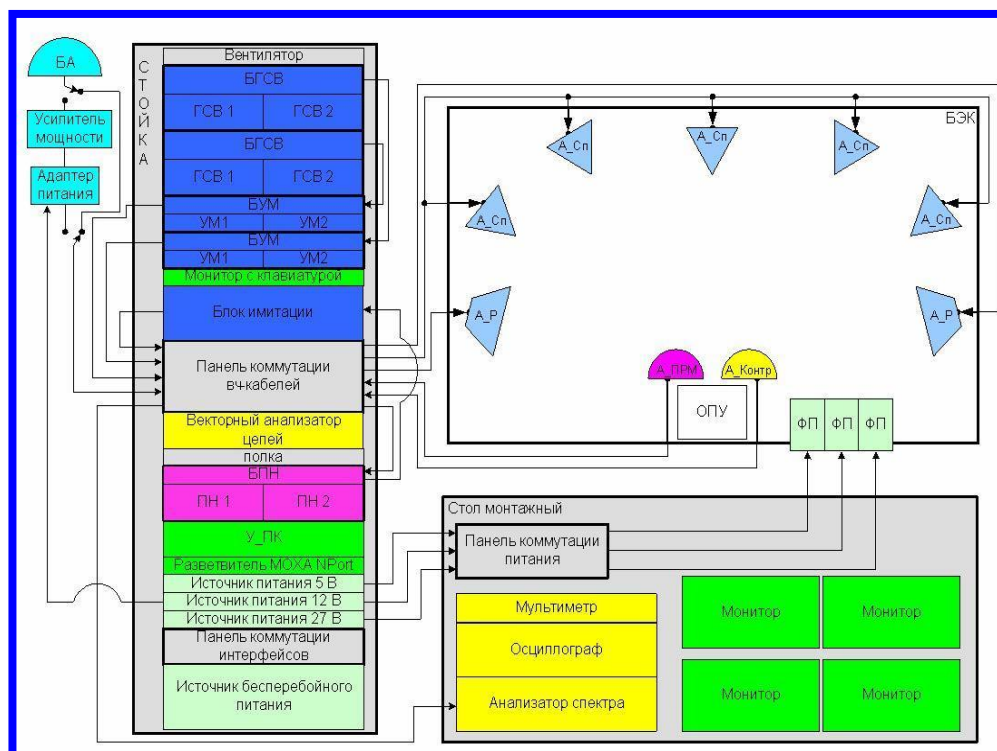


Рис. 18. Структура комплекса имитации пространственного навигационного поля ГНСС

Следующим направлением работ является создание и развитие средств метрологического обеспечения средств измерений длины, включая стационарный комплекс до 60 м на основе фемтосекундного лазера (рис. 19), транспортируемый интерферометр (рис. 20) и комплекс до 3000 м.

По окончании выполнения работ должны быть достигнуты следующие основные характеристики:

воспроизведение единицы длины в диапазоне до 60 м с погрешностью не более $1 \cdot 10^{-5}$ м,

воспроизведение единицы длины в диапазоне до 3 км с погрешностью не более $8 \cdot 10^{-4}$ м.

Результаты проведенных по вышеуказанным направлениям работ в рамках эскизных и технических проектов подтверждают возможность выполнения поставленных задач в соответствии с предложенными техническими решениями. Совместно с работами, которые будут проводиться в рамках ФЦП на более поздних этапах, результаты вышеуказанных работ позволят оценить и контролировать характеристики перспективных средств измерений, применяемых в системе ГЛОНАСС, а

следовательно, их создание будет являться необходимым условием для выполнения важнейших требований к системе.



Рис. 19. Макет стационарного комплекса до 60 м. на основе фемтосекундного лазера

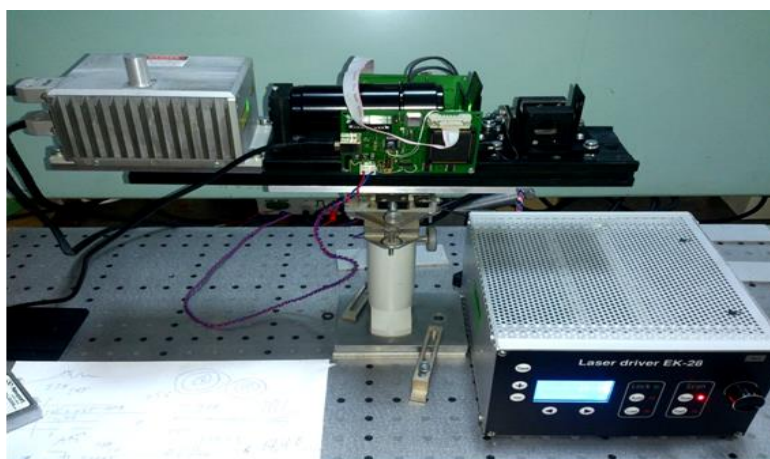


Рис. 20. Макет транспортируемого интерферометра

На основании представленных данных о направлении деятельности ФГУП «ВНИИФТРИ» в рамках поддержания и развития системы ГЛОНАСС можно сделать обоснованное заключение о том, что сбалансированное развитие всех составных частей комплексов метрологического и фундаментального обеспечения в ГЛОНАСС является необходимым условием для достижения целей, поставленных перед системой ГЛОНАСС

на ближайшие годы, - массового внедрения отечественных навигационных технологий, гарантированного предоставления потребителям всех категорий навигационных услуг с учетом непрерывно возрастающих требований к ним в интересах национальной безопасности и социально-экономического развития Российской Федерации, укрепления её лидирующих позиций в области глобальной спутниковой навигации.